昆 虫 学 报 *Acta Entomologica Sinica*, January 2008, 51(1):81 – 90 ISSN 0454-6296

道路交通污染对昆虫的影响

高慧璟,常晓娜,陈法军*,翟保平

(南京农业大学昆虫学系,昆虫信息生态学实验室,南京 210095)

摘要:综述了国内外近年来道路交通污染及其空气污染物对昆虫影响的研究状况。介绍了交通污染的现状,阐述了汽车尾气中不同污染物,包括二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x,包括 NO 和 NO_2)、碳氧化物(CO_x,包括 CO 和 CO_2)、挥发性有机物(VOCs)、酸雨和臭氧(O_3),以及细颗粒扬尘等污染物对昆虫发生和种群适合度等的影响,并分析了交通污染影响昆虫的作用机理,指出了国内今后该领域的研究方向。此外,道路交通污染对周边生物环境也会造成相关的生态影响。今后应加强生态道路建设,减轻交通污染对路域生态系统的影响。

关键词:交通污染;路域生态系统;昆虫;作用机理;生态影响

中图分类号:Q965 **文献标识码**:A **文章编号**:0454-6296(2008)01-0081-10

Impacts of roadway traffic pollutions on insects

GAO Hui-Jing, CHANG Xiao-Na, CHEN Fa-Jun*, ZHAI Bao-Ping (Insect-information Ecology Group, Department of Entomology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The effects of roadway traffic pollutions and atmospheric pollutants on insects were reviewed based on the recently domestic and international studies. An introduction was presented about the status of roadway traffic pollutions and the impacts of the pollutants of automobile exhausted gas, *e.g.*, sulfur dioxide (SO_2), nitrogen oxide (NO_x, including NO and NO_2), carbon oxide (CO_x, including CO and CO_2), volatile organic compounds (VOCs), acid rain, ozone (O_3) and particulate matters (PM), on the occurrence, performance and population fitness of insects, and the function mechanisms of the above pollutants were also elucidated. Moreover, some topics about the impacts of roadway traffic pollutions on insects were also provided to advise the future research in China. Furthermore, some ecological effects on peripheral environment of road-region ecosystems were also caused by roadway traffic pollutions. In the future, the constructions of ecological roadways should be reinforced in order to alleviate the adverse impacts of traffic pollutions on road-region ecosystems.

Key words: Traffic pollution; road-region ecosystem; insect; function mechanism; ecological effect

20 世纪以来,随着工业化、城市化、经济全球化等步伐的加快,加之当前交通运输工具(主要是汽车)数量急剧增加,致使道路建设规模不断扩大而又不断滞后,交通拥挤、堵塞等现象日趋严重。机动车驱动所产生的气体污染物(atmospheric pollutants)和微尘(motes),尤其是燃油发动机排放的细颗粒物(particulate matters, PM)、臭氧(O_3)等二次污染物(secondary pollutants),使交通主干线及其临近空气中氮氧化物(NO_x)和碳氧化物(CO_x)等常年超标(赵承易等,2001;Hausberger *et al*.,2003;Zechmeister *et al*.,2005)。机动车排气污染已成为当前大气污染的主要来源(Colvile *et al*.,2001)。据预测,2010 年国内一些大城市机动车排放的污染物将占空气污染源的 64%(訾琨等,2006)。当前,大气污染已由'煤烟还原型'转向以汽车尾气为主的'燃料氧化型'(Colvile *et al*.,2001)。之前,有关大气污染对昆虫

基金项目:国家重点基础发展规划(973)资助项目(2006CB102007);瑞典国际科学基金项目(C/4164-1);国家自然科学基金项目(30700527);教育部博士点基金(新教师项目)(20070307002);南京农业大学青年科技创新基金(KJ07003);中国科学院动物研究所'农业虫鼠害综合治理研究国家重点实验室'开放基金(Chinese-IPM-0601)

作者简介:高慧璟,女,1984 年生,上海人,硕士研究生,主要从事昆虫生态专业、全球变化生物学方面研究,E-mail:ghj.1984.0403@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail:fajunchen@njau.edu.cn;Tel.:025-81588318;Fax:025-84395242

收稿日期 Received:2007-06-03;接受日期 Accepted:2007-11-11

种群发生的影响研究及其机理探讨的综述文章很多(Alstad and Edmunds, 1982; Führer, 1985; 吴坤君, 1988; 吴亚和金翠霞, 1991, 1993; 吕仲贤等, 1994)。大气污染主要通过影响寄主植物,如改变组织结构(李忠谱和吴曙, 1991; Huttunen, 1994; Fink, 1998)、氨基酸组成(Bolsinger and Flückiger. 1989; Viskari *et al*., 2000)、次生代谢产物(Dohmen, 1985; 吴亚和金翠霞, 1990; Arndt, 1995; Viskari *et al*., 2000; Mondor *et al*., 2004)和植物氮素代谢(Marsh *et al*., 2004)等间接影响昆虫的发生危害;或通过影响'植物-害虫'(如 Dohmen, 1988; Stinner *et al*., 1988; 吴坤君等, 1997)、"植物-害虫-天敌"(如 Holton *et al*., 2003)之间的相互关系而作用于昆虫种群。

道路交通污染作为大气污染的主要原因之一,其对昆虫种群的影响与大气污染的影响虽有相同之处,但又有其特点。国外,有关道路交通污染对昆虫影响的研究仅见个例报道,且大都集中于蚜虫种群,如 Flückiger 等(1978), Braun 和 Flückiger(1984a, 1984b, 1985)报道,交通干线两侧蚜虫发生严重;而 Jones 和 Paine(2006)则发现,洛杉矶城市周边森林受空气污染后,林内昆虫种群结构发生改变,进而导致森林生态系统的营养循环发生改变。国内,近年来科学家也开始关注交通造成的环境污染对路域生态系统的影响(如杨三才等, 1993; 李仙虎, 1998; 赵承易等, 2001; 李月辉等, 2003; 李其林和王显军, 2004; 崔巍, 2005; 康玲芬等, 2006; 叶中进, 2006; 尹忠东等, 2006; 孟文阁和杨毅伟, 2006)。

而至今,国内尚无道路交通污染对昆虫影响的具体研究报道。交通道路两边往往为农田或森林生态系统,随着国内近年来道路建设飞速发展和交通运输工具的急剧增加,昆虫作为道路生态系统的重要生物因子之一,必然受到道路交通污染的极大影响,进而导致路域生态系统变化。本文就近几十年来国内外有关道路交通污染对昆虫影响的相关报道做一综述,并提出国内今后这一领域的研究方向。

1 交通污染概况

1.1 交通污染定义

交通污染主要指汽车排放的尾气、车轮与地面磨擦产生的橡胶微粒、车辆驶过时扬起的尘埃以及冬季使用的防冻液(antifreeze;主要是 NaCl 等钠盐)对空气造成的污染(吴坤君, 1988)。其中,汽车尾气排放是造成交通污染的主要原因(Kuhns *et al*., 2004; Colberg *et al*., 2005)。汽车尾气中含有大量的一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO_2)等碳氧化物(CO_x),一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO_2)等氮氧化物(NO_x),碳氢化合物(HC)等挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs),二氧化硫(SO_2)和 PM 等(钱耀义, 1987; 李仙虎, 1998; 赵承易等, 2001; Hausberger *et al*., 2003; Zechmeister *et al*., 2005; Bignal *et al*., 2007)。它们在城市大气污染中分别占 82%, 48%, 58%, 1.3% 和 8%(钱耀义, 1987)。其中, NO_x 中 NO 和 NO_2 分别占 95% 和 5%(Carslaw, 2005); VOCs 则主要包括乙烯,甲醛,甲苯,二甲苯等(蒋维楣等, 2001; Viskari *et al*., 2001)。一般而言,交通污染主要限于道路两侧 150 m 以内,在 50 ~ 100 m 范围内空气污染最为严重(Bignal *et al*., 2007);且污染程度随着距离交通主干道空间距离的增加及交通流量的减少而下降(康玲芬等, 2006; 杨三才等, 1993; 叶中进, 2006; Hooda *et al*., 2007)。

1.2 交通污染物的生态效应

CO 被人吸入后会出现恶心、头晕、疲劳等缺氧症状,浓度达到 11.7 μL/L 数分钟内可致人死亡。目前,尾气排放物中的 CO_2 虽未列入污染物质中,但 CO_2 作为主要的'温室气体'其导致的温室效应不容忽视(吴亚和金翠霞, 1993);此外,作为主要的'光合作用'原料之一, CO_2 浓度增加对植物、害虫和天敌等产生重要影响(戈峰和陈法军, 2006)。HC 是刺激性气体,可引起结膜炎、鼻炎、支气管炎等症状,破坏造血机能,降低肺对传染病的抵抗力,特别是多环芳烃化合物的危害更大,是强致癌物质(孟文阁和杨毅伟, 2006)。世界各国对 NO_x 污染特别重视。其中, NO 还是重要的非生物激发子(elicitor),可有效调节植物次生代谢途径(Wang and Wu, 2004; Xu and Dong, 2005)。此外, NO_x 和 SO_2 等气体与水结合形成酸性物质,从而使交通主干道两侧土壤的'电导率'(electric conductivity)和有机碳含量显著提高,而 pH 值则显著降低(康玲芬等, 2006); NO_x 与 HC 在紫外线照射下极易发生'光化学反应'(photochemical reaction),形成以 O_3 和过氧酰基硝酸盐(peroxide acyl nitrate, PAN)为主的"光化学烟雾"(photochemical smog)。过去几十年中,近地表层大气臭氧浓度逐渐增高已成为城市空气中最重要的污染物之一(蒋维楣等, 2001)。当 O_3 达到一定浓度时会使植物短期内发生高温氧化而脱水死亡;同时, O_3 污染会使农作物减产(于光荣, 2001)。PAN 对眼睛及呼吸系统

都有强烈的刺激作用。PM 和其他杂质，主要有碳烟(80%～90%为碳氢化合物)、铅化物(Pb)以及三效催化净化器因磨损而剥落下来的重金属等对人体的危害也很大(Cuny *et al*.，2001；崔巍，2005；Hooda *et al*.，2007)。汽车排放的铅对空气污染的分担率高达 80%～90%，公路两边 50 m 以内的土壤和蔬菜的铅含量明显增加(Cuny *et al*.，2001；李其林和王显军，2004)。

1.3　交通污染的环境影响

随着交通规模日益扩大，城市自然绿地减少、气候变暖、空气干燥、灰尘和有害气体污染加剧，这不仅影响人类健康，也影响到周边自然生境及其生物安全。此外，道路交通对周边'理化'环境的影响还表现在对水、土、声、热等多种环境要素的影响方面。据有关研究表明，白天(尤其是盛夏)，水泥沥青路面的温度能很快增至 40℃以上，加之路域空气粉尘、CO 和 CO_2 含量等增高以及车辆散热，使得道路成为了一个'热浪带"。因此，路域生态系统多呈现干热的小气候特征(Viskari *et al*.，2000；尹忠东等，2006)。道路除了改变'路域生态系统'的环境，影响其生命系统的组成外，其施工过程中的山体切削、森林砍伐，大量人流和车流的进入等对乔木层、灌木层和草本层的破坏尤为明显，从而使局部群落的生物多样性降低、层次缺失和群落垂直结构发生较大改变(孙书存和包维楷，2004)。乔木层由于缺乏灌丛保护，对环境的抵抗能力下降，易感染病害和遭受风折，植物群落对环境的适应和调节能力等降低，稳定性下降，并导致群落演替的停止甚至逆行演替。道路建设对动物的影响主要包括致死、移动格局、过滤等方面，其影响方式主要通过植被破坏、通道阻隔、施工噪声和营运灯光等施加。道路对动物最直接的影响就是车辆导致的死亡，即动物的"'道路致死"。道路致死的动物数量较大，涉及的种类很广，包括脊椎动物、两栖类、爬行类和昆虫等(尹忠东等，2006)。

从景观生态学的角度看，道路可被视作廊道(corridors)，是具有'传导'或'屏障'功能的线状或带状景观要素，是联系孤立斑块(patches)之间以及斑块与种源之间的线性结构。道路作为典型的人工廊道还有其特殊性，其'连通度"(connectivity)为 1.0，即完全连通。所以，其传导和屏障能力尤为突出。一方面，道路'廊道'利于物种的空间运动和孤立斑块内物种的生存和延续，但廊道本身也可能是一种危险的景观结构，可引起天敌进入本来是安全的庇护所(refuges)，导致某些残留物种的灭绝。同时，道路作为深入景观的途径，利于人类的土地开发和利用，从而造成更强烈地景观格局和过程等的改变，损害斑块内优势物种和稀有种，最终导致生物多样性降低(李月辉等，2003)。

2　主要交通污染物对昆虫种群发生的影响

2.1　SO_2 对昆虫的影响

SO_2 是汽车尾气的主要成分之一。大气 SO_2 浓度增加可促进多种害虫种群的发生(吕仲贤等，1994)，只有浓度极高时才可能对昆虫起抑制作用(吴坤君等，1990；李秀珍等，1992)。此外，谢映平等(1998)研究证实，山西太原街道两旁国槐的瘤坚大球蚧 *Eulecanium gigantean* 和皱大球蚧 *E*. *kuwanai* 的种群密度都与汽车流量呈线性正相关，这主要是汽车尾气中的 SO_2 和 P_b 污染所造成的。当然，不同种类昆虫对 SO_2 污染的反应不同。如 SO_2 可延长黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster* 的生长发育(Ginevan and Lane，1978)，刺激美洲脊胸长蝽 *Oncopeltus fasciatus* 的发育和繁殖，而对寄生性麦蛾茧蜂 *Bracon hebetor* 的发育无影响(Petters and Mettus，1982)。此外，Clausen(1986)发现蜘蛛种类和数目与大气 SO_2 含量显著负相关。可见，交通污染导致大气 SO_2 浓度升高无疑会降低蜘蛛等捕食性天敌对植食性昆虫的捕食作用。

2.2　NO_2 对昆虫的影响

交通车辆的尾气排放是大气 NO_2 的重要来源之一。与 SO_2 相似，昆虫对 NO_2 的反应也具有种的特异性'species-specific"，且寄主植物不同，其反应也可能不一样(Houlden *et al*.，1990，1991)。NO_2 薰气处理可提高甜菜蚜 *Aphis fabae* 的平均相对生长率(mean relative growth rate，MRGR)(Dohmen *et al*.，1984)，增加其种群密度(Bolsinger and Flückiger，1989)。此外，100 ppm NO_2 薰气处理还可显著提高麦长管蚜 *Sitobion avenae*、麦无网长管蚜 *Metopolophium dirhodum*、禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi*、甜菜蚜 *A*. *fabae* 和豆长管蚜 *Macrosiphum albifrons* 的 MRGR(Houlden *et al*.，1990)。

2.3　酸雨对昆虫的影响

汽车尾气中的 NO_x 和 SO_2 在大气中反应会形成酸雨。酸雨可直接影响昆虫的生长发育、取食量、化蛹率和繁殖力以及种群密度等。酸雨发生区，林木

长期受酸雨危害，致使长势衰弱，导致次期性害虫入侵，从而加速林木衰退（杨金宽等，1991）。植食性昆虫对酸雨的反应相当复杂，且与酸度有关（张云等，2002）。如最初几天，pH 2.75 的酸雾可延缓叶甲 *Trirhabda geminata* 的生长发育，降低其存活率；但一段时间后，酸雾对该虫的作用降低（Redak *et al*.，1995）。这说明 *T. geminata* 对酸雾胁迫的反应随时间延长，其适应和忍受能力增强。此外，酸雨对昆虫直接影响还与昆虫对酸雨的忍受力及适应能力有关。如 pH < 3 的酸雨仅影响 *T. geminata* 的发育，却不致死（Redak *et al*.，1995）。而对蜜蜂而言，当酸雨 pH 值在 4.2 ~ 3.0 时，蜜蜂泌蜜量下降 60%，蜂群死亡增多；pH < 3 时，泌蜜停止，蜂群惨死（李忠谱和吴曙，1991）。

酸雨可促进小地老虎 *Agrotis ypsilon* 幼虫的取食，加速其发育，导致其体重增加、预蛹期缩短；但其同化系数降低（Stinner *et al*.，1988）。在 pH 4.0 的酸雨影响下，朱砂叶螨 *Tetranychus cinnabarinus* 在菜豆上的种群密度和危害程度均大于对照（王进军和赵志模，2002）。另外，酸雨可以使湖泊酸化，进而会影响水生昆虫的生物多样性等。在自然环境条件下，很难区分酸雨对害虫的影响是直接作用还是间接影响。事实上，害虫和植物乃至整个生态系统都是酸雨的受体。因而，大多数情况下，酸雨对害虫的影响是综合的（王进军和赵志模，2002）。

2.4 O_3 对昆虫的影响

汽车尾气排放中的 NO_x 和挥发性 HC 通过"光化学反应"形成的 O_3 也会影响路域生态系统内害虫的发生和危害。如 0.3 ppm O_3 熏蒸处理可导致 15%的蝇卵不能孵化，但成虫产卵量反而增多（吴亚和金翠霞，1991；Alstad *et al*.，1982；Levy *et al*.，1972）。用 45 ppm O_3 对赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 和杂拟谷盗 *T. confusum* 做熏蒸处理后发现，不同种类、不同发育期的谷盗对 O_3 的敏感性不同（Erdman，1980）。低浓度 O_3 导致舞毒蛾 *Lymantria dispar* 和墨西哥瓢虫 *Epilachna varivestis* 取食量增加（Jeffords and Endress，1984；Endress and Post，1985；Dohmen，1988；Braun and Flückiger，1989）。而高浓度 O_3 可导致烟草天蛾 *Manduca sexta* 的产卵率和幼虫体重明显增加（Holopainen *et al*.，1997），*M. sexta* 的存活率和生长率也都提高了（Jackson *et al*.，2000）。取食 O_3 污染的菜豆叶后，墨西哥瓢虫 *E. varivestis* 的蛹重明显高于对照处理（吴亚等，1990）。此外，O_3 污染对昆虫信息物质的传递也有影响。高浓度 O_3 条件下，毛蚜 *Chaitophorus stevensis* 对报警信息素（alarm pheromone；主要成分是（反）-β-法尼烯）的反应加强，表现为逃逸行为增强，且成蚜比若蚜受 O_3 影响更明显（Mondor *et al*.，2004）。用性信息素（sex pheromone）诱捕云杉八齿小蠹 *Ips typographus*，在高浓度 O_3 的地方日平均诱捕量较高（Grodzki *et al*.，2004）。另外，O_3 也是"温室气体"之一，地面 O_3 浓度增加必将增强全球温室效应，影响全球植物群落的分布，可能进而会对昆虫的分布带来影响（吴亚和金翠霞，1991；倪健和宋永昌，1997）。再加之高空平流层 O_3 层破坏严重，导致太阳紫外辐射强度加剧，进而对地球生物有着长远的生物学效应（特别是遗传变化），最终将不可避免地对植物和昆虫之间相互关系产生深远影响（吴亚和金翠霞，1991）。

2.5 微粒等细颗粒污染物

汽车尾气中铅化物（Pb）等微粒飘落到公路干线两侧的植物表面，与植物组织结合后很难分解，往往通过食物链（food chains）转移到植食性昆虫及其天敌体内（Williamson and Evans，1972，1973），并通过"生物富集"作用（bio-accumulation）对害虫天敌造成严重威胁（Price *et al*.，1974；Port and Thompson，1980）。研究表明，胡蜂 *Polistes dominulus* 种群数量与距 P_b 源（Urbini *et al*.，2006）和尘埃源（吴亚和金翠霞，1992）的远近明显相关，可看到从公路两侧延伸时黄蜂数量的梯度变化。此外，寄生性膜翅目昆虫对尘埃特别敏感，在尘埃污染严重条件下，其对植食性昆虫的控制作用大为减弱。如由于寡节小蜂 *Eulophidae* 被尘埃所压制，以致黑松叶盾蚧 *Naculaspis californica* 在美国黄松上大发生（吴亚和金翠霞，1992）。

汽车在冬季使用的防冻液（即除冰盐 NaCl 等）会使植物"理化"成分变化有利于昆虫的种群发生（Arms *et al*.，1974）。如在山楂树上喷洒 NaCl 可使其韧皮部渗出液的天冬氨酸（Asp）、谷氨酰胺（Glu）等含量增加 40%以上，其他氨基酸和含糖量也有不同程度的增加。寄主植物成分的这些变化必将影响害虫的发生危害（吴坤君，1988）。

3 交通污染对昆虫影响的作用机理

3.1 直接影响

交通污染物对昆虫的直接影响主要表现在特定

污染物对昆虫生理代谢等的影响方面。其中，SO_2 可加速昆虫体内 α-GPDH 的生物合成与异构化潜力，提高其 α-GPDH 活性；而 α-GPDH 可调控 NAD^+/NADH，从而提高昆虫飞行等活动所需 ATP 的产生，也促进甘油酯与护蜡层等合成，进而改善昆虫的行为及其防卫能力（Zera *et al*.，1985）。这在柳毒蛾 *Leucoma salicis* 中得到证实（Migula and Karpinska，1988）。此外，交通污染还能干扰昆虫信息素合成及其活性，如 O_3 能破坏黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster* 性信息素的生物活性，进而导致其种群数量下降（Arndt，1995）。另外，昆虫本身也有适应环境胁迫的能力。如酸雨胁迫可引起朱砂叶螨 *Tetranychus cinnabarinus* 主要酶系及能源物质的活性（含量）变化，其中，SOD，POD，CAT，以及 ACP 等酶活性增强，可溶性糖和甘油三酯含量增加（王进军和赵志模，2002）。这是 *T. cinnabarinus* 适应酸雨胁迫的生理生化机制（张建萍，2004）。此外，交通污染及其污染物导致路域生态系统气候干热可加快蚜虫的发育速率（Braun and Flückiger，1984a，1984b，1985；Viskari *et al*.，2000）。另据报道，干尘也能引起某些螨类的大发生（吴坤君，1988）。

3.2　间接作用

昆虫取食危害明显地依靠来自于寄主植物的物理（化学）刺激，主要包括植物次级代谢产物（如拒食剂、引诱剂、忌避剂）和植物营养成分（如糖类、氨基酸、蛋白质）变化等（钦俊德，1980）。交通污染通过影响植物而间接作用于昆虫的主要机制概括如下。

3.2.1　植物营养品质变化对昆虫的影响：交通污染及其污染物可通过改变植物的营养品质及其组织结构等间接作用于昆虫的发生危害等。低浓度 SO_2 和 NO_x 可导致植物组织内可溶性蛋白和游离氨基酸等含量增加（Dohmen *et al*.，1984）。而 O_3 可提高西红柿等植物组织内可溶性蛋白、氨基酸、糖类以及酚类等代谢产物含量（Holopainen *et al*.，1991）。Port 和 Thompson（1980）分析指出，英国曼彻斯特郊区汽车尾气中 NO_x 排放增加了绿化灌木的氮含量，这是 1975 年以来圆掌舟蛾 *Phalera bucephala* 连续大暴发的根本原因。当植物用 SO_2，O_3 和 NO_2 熏蒸，或根际盐分胁迫时，包括谷胱甘肽（Glutathione，GSH）在内的水溶性氢硫基化合物的浓度增加；单独用 SO_2 熏蒸时，植物 GSH 的最高浓度出现在 760 $\mu g \cdot m^{-3}$ SO_2 浓度处理下，取食这种浓度 SO_2 熏蒸 48 h 后的豆叶后，墨西哥瓢虫 *Epilachna varivestis* 的蛹重增加 1.20 倍，豆叶内 GSH 浓度也增加 1.97 倍（吴亚和金翠霞，1990）。浓度为 55 ppb 的 SO_2 熏蒸菜豆 8 周后叶片的可溶性蛋白增加 7.3%，而浓度为 185 ppb 和 370 ppb 的 SO_2 熏蒸相同时间，菜豆叶的可溶性蛋白却下降 7.0%与 16.5%（Sardi，1981）。这在一定程度上解释了低浓度 SO_2 污染下墨西哥瓢虫的 MRGR 增加，而在较高浓度 SO_2 污染下其 MRGR 下降的内在原因。吴坤君等（1997）研究发现，蛋氨酸（Met）含量变化与 SO_2 浓度变化相关联。根据蛋氨酸相对含量变化与桃蚜的 MRGR 变化推测，SO_2 污染诱导的食料植物 Met 相对含量的变化可能是促进这些害虫危害加重的一个重要原因。

3.2.2　植物次生代谢变化影响其抗虫性：交通污染及其污染物干扰了路域生态系统内植物内源次生防卫物质的合成代谢，进而影响害虫的发生危害。如 SO_2，NO_x，酸雨和 O_3 可影响玉米的萜类催化酶（terpenes enzymes）活性，导致萜类物质（terpenoids）数量下降，从而引起蚜虫种群上升（Moreau，1988）。欧洲赤松针叶的萜烯类物质在 SO_2 与氟污染下会发生显著的变化（Lehtiö，1981）。当然，大气污染引起植物的酚类、单萜类和树脂酸类物质的具体变化相当复杂，限于当前研究水平，对其认识仍是模糊的（Kainulainen *et al*.，1993）。酚化物既可作为昆虫的营养物，也可作为其生长抑制剂，从而导致害虫种类的演替（succession）变化。如受污染危害的云杉，由于酚类物质改变，其防御能力下降，导致蚜虫危害加重（吴亚和金翠霞，1990）。

3.2.3　其他：交通污染及其污染物还会通过改变植物组织含水量、pH 值和组织结构等影响害虫的发生。在 NO_2 和 NH_3 污染区，针叶可包含更多水分，致使欧洲松梢小卷蛾 *Rhyacionia buoliana* 和松芽麦蛾 *Exoteleia dodecella* 等潜叶害虫的数量增加（吴亚和金翠霞，1990）。Wellburn 和 Wolfenden（1986）研究发现，当环境 pH 值降低 3 个单位，植物细胞液的 pH 值会降低 0.3 个单位。植物体内 pH 值的变化会改变昆虫所需营养物质的溶解性，这可能是酸雨等污染物影响昆虫取食和生长发育的重要因素。而蚜虫是一类刺吸植物汁液的害虫，它们对食物 pH 值的变化比其他昆虫更敏感。例如豌豆蚜 *Acyrthosiphon pisum* 能区别 pH 相差 0.13～0.16 个单位的食料，且更喜爱在弱酸性植物部位取食。因此，酸雾和酸雨引起寄主植物 pH 值的变化是促进豌豆蚜生长发育的一个重要原因（Braun and Flückiger，1989）。另外，

大气污染物对植物表面结构的影响，如破坏腊层、腐蚀树叶角质层等，也可促进昆虫取食（张建萍等，2004）。而在高浓度 SO_2 熏蒸下，植物气孔导度下降使组织中 GSH 含量减少，进而影响害虫发生（吴亚，1989；吴亚和金翠霞，1990）。另有研究表明，树脂道数量和大小与松针麦蛾 *Exoteleia pinifoliella* 的危害程度密切相关（吴亚和金翠霞，1992）。树脂道可避免松象鼻虫 *Rhynchophorus* sp. 的危害，如西部白松 *Pinus monticola* 比北美白松 *P. strobus* 具有更多的皮层树脂道，因而前者受害虫危害轻（吴亚和金翠霞，1992）。空气污染可损坏针叶的树脂道，改变树脂组成和性质，甚至使树脂的粘滞性发生变化，这些改变都影响其虫害的发生（李天安，1992）。空气污染还可影响针叶树所含油脂的组成，从而影响树木的抗虫性（张建萍等，2004）。

交通污染及其污染物还可通过影响寄主植物及其天敌昆虫而间接作用于害虫的种群发生。如叶甲 *Phratora polaris* 长期取食酸雨影响的山桦后，使天敌（如蚂蚁、步甲和鸟等）对它的敏感度增加（Palokangas *et al*.，1995）。此外，酸雨还能增强某些昆虫对病害的抗性，如松黄叶蜂 *Neodiprion sertifer* 受酸雨胁迫后，对多角体病毒（polyhedrosis virus）的敏感性大为降低（Neuvonen *et al*.，1990；Saikkonen and Neuvonen，1993）。O_3 能通过各种途径改变寄生性天敌的适合度，如高浓度 O_3 条件下膜翅目寄生性天敌的搜索效率下降，对寄主的寄生率降低（Gate *et al*.，1995）。O_3 还可通过影响寄主昆虫的发育，进而影响其天敌的发育与存活，如 O_3 处理有利于森林天幕毛虫 *Malacosoma disstria* 的生长发育，却显著降低其天敌康刺腹寄蝇 *Compsilura concinnata* 幼虫的存活率（Holton *et al*.，2003）。大量文献记载了大气污染对蜘蛛类节肢动物的影响，特别是对土壤与枯枝落叶层内蛛形纲区系的影响。Clausen（1986）发现，蜘蛛种类和数目与大气 SO_2 含量显著负相关，这无疑也会降低蜘蛛对植食性昆虫的捕食作用。

综上所述，由于植物对交通污染及其污染物的反应不同，而昆虫对其适应性也存在种间差异，从而导致交通污染对昆虫的影响复杂多变。实际环境中，交通污染对'植物-昆虫'生态系统所造成的影响应该是综合的。从总体上看，交通污染对路域生态系统的胁迫机制，在宏观方面，能使生态系统的结构和功能，以及代谢机制发生变化，多样性降低，优势种更替加快；在微观方面，则引起植物防御机制及其代谢生理等变化；进而改变植物防卫机制以及植物与有害生物之间的动态平衡（张建萍，2004）。

4 展望

综上所述，交通污染除了能直接对昆虫产生影响外，作为一种新的环境压力（environmental stress），使得路边植物在不得不'对付'其造成的环境压力的同时，就不能同时激活其防卫机制。因此，交通污染作为一种新的环境压力常常使一些次要害虫演变为主要害虫（Dohmen，1985）。昆虫作为路域生态系统中的一个组成成分，同该系统中的非生物因素（如气候等）和生物因素（如植物、天敌等）是紧密联系、互相依赖、融为一体的，这些因素的任何变化都可能对昆虫种群的发生产生影响。可惜的是，国内外直接针对交通污染对昆虫影响的机理研究并不多，且多是表面现象观察，国内这方面的研究更是匮乏。大多研究多是基于大气污染及其污染物对环境和植物影响及其对昆虫作用机理的探讨。

道路交通污染是大气污染的主要因素之一，有关大气污染及其污染物对昆虫影响的内在机理可用于指导当前交通污染及其污染物对昆虫的影响研究。当然，交通污染与大气污染的影响虽有相同之处，但也具有自己的特点。因此，研究中应结合我国路域生态系统的独特性开展以下研究：

（1）昆虫系统调查：首先要明确当前我国路域生态系统的环境异质性、植被和昆虫多样性等。并根据昆虫对交通污染的反应类型进行区系分类。如 Führer（1985）把植食性昆虫分为 3 类，即：喜好严重空气污染种类，如松芽麦蛾 *E. dodecella*、欧洲松梢小卷蛾 *Rhyacionia pinicolana*、红松实小卷蛾 *Retinia resinella*、木蠹象 *Pissodes punctatus*、云杉阿扁叶蜂 *Acantholyda piceacola* 和大部分蚜虫等；重污染区很少见，常出现在中度污染区，且数量大，如大蚜科（Lachninae）一些种类、松扁蝽 *Aradus cinnamomeus*、小蠹科（Scolytidae）一些种类等；在非污染环境中是常见种，如许多鞘翅目（Coleoptera）和膜翅目（Hymenoptera）昆虫。

（2）道路交通污染与昆虫适合度分析：近年来，国内陆路交通飞速发展，交通繁忙、路况拥堵严重，污染恶化。今后，应结合我国路域生态系统现状，在开展昆虫系统调查的同时，明确其种群适合度与交通污染的内在关联。同时，利用昆虫对交通污染物反应的特异性'species-specific'，进行环境检测

指示生物研究（Viskari *et al.*，2000；Urbini *et al.*，2006）。

（3）交通污染物对植物或昆虫的综合作用：相关机理研究大都是通过一种污染物（如 SO_2 或 NO_2 等）熏蒸处理开展的。实际情况下，交通污染物是同时存在，共同起作用的。植物对这些污染物可能表现"交互抗性"或"拮抗作用"，且昆虫对不同污染物的反应也具有种特异性"species-specific"。此外，污染物之间可能会发生"生化"反应，如 NO 与 O_3 反应可生成 NO_2（Hueglin *et al.*，2006），NO_x 与 HC 在紫外线照射下形成以 O_3 和 PAN 为主的"光化学烟雾"，而 NO_x 和 SO_2 在大气中反应会形成酸雨。因此，交通污染物对植物或昆虫的联合反应是复杂的。

（4）交通污染对"植物-昆虫"关系研究：多数交通污染物可导致植物"理化"性质改变，进而影响昆虫与植物关系，尤其是对植物次生防卫物质和内源信号转导的影响。如 NO_x 中的 NO 可调节植物次生代谢途径（Wang and Wu，2004；Xu and Dong，2005），提高异黄酮含量及改变细胞超微结构（罗建平等，2006），进而提高植物化学抗虫性（张泓，1994；Alcantara *et al.*，2005）。

（5）生态道路建设：国家应积极建设高效率、低能耗、低污染的绿色环保的交通系统，大力推动"绿化林带"工程，建设生态城市，加快种植能高效吸附（吸收）粉尘和有害气体的树种，增强对空气的净化功能。研究表明，道路两旁种植的树木对交通污染物有屏蔽作用（Marsh，2004）。另一方面，要积极维护路域生态系统的生物多样性及其稳定性，减轻交通污染对路域生态系统内昆虫的影响，从根本上控制害虫的暴发危害。实际工作中还应积极采取有效措施治理交通污染，改进汽车内燃机机构，控制汽车尾气的排放，尽早出台相关立法和生态措施以减轻交通运输工具的尾气排放对环境造成的污染。

参考文献（References）

Alcantara J，Bird DA，Franceschi VR，Facchini PJ，2005. Sanguinarine biosynthesis is associated with the endoplasmic reticulum in cultured opium poppy cells after elicitor treatment. *Plant Physiology*，138：173 – 183.

Alstad DN，Edmunds GF，Weinstein LH，1982. Effects of air pollutants on insect populations. *Annual Review of Entomology*，27：369 – 384.

Arms K，Feeny P，Lederhouse R C，1974. Sodium：stimulus for pudding behavior by tiger swallowtail butterflies，*Papilio glaucus*. *Science*，185：372 – 374.

Arndt U，1995. Air pollutants and pheromones：A problem？*Chemosphere*，30：1 023 – 1 031.

Bignal KL，Ashmore MR，Headley AD，Stewart K，Weigert K，2007. Ecological impacts of air pollution from road transport on local vegetation. *Applied Geochemistry*，22(6)：1 265 – 1 271.

Bolsinger M，Flückiger W，1989. Ambient air pollution induced changes in amino acid pattern of phloem sap in host plants – relevance to aphid infestation. *Environmental Pollution*，56 (3)：209 – 216.

Braun S，Flückiger W，1984a. Increased population of the aphid *Aphis pomi* at a motorway：Part 1 – field evaluation. *Environmental Pollution* (*Series A*)，33：107 – 120.

Braun S，Flückiger W，1984b. Increased population of the aphid *Aphis pomi* at a motorway：Part 2 – the effect of drought and deicing salt. *Environmental Pollution* (*Series A*)，36：261 – 270.

Braun S，Flückiger W，1985. Increased population of the aphid *Aphis pomi* at a motorway：Part 3 – the effect of exhaust gases. *Environmental Pollution* (*Series A*)，39：183 – 192.

Braun S，Flückiger W，1989. Effect of ambient ozone and acid mist on aphid development. *Environmental Pollution*，56：177 – 187.

Carslaw DC，2005. Evidence of an increasing NO_2/NO_x emissions ratio from road traffic emissions. *Atmospheric Environment*，39：4 793 – 4 802.

Clausen IHS，1986. The use of spiders (Araneae) as ecological indicators. *Bulletin of the British Arachnological Society*，7 (3)：83 – 86.

Colberg CA，Tona B，Catone G，Sangiorgio C，Stahel WA，Sturm P，Staehelin J，2005. Statistical analysis of the vehicle pollutant emissions derived from several European road tunnel studies. *Atmospheric Environment*，39：2 499 – 2 511.

Colvile RN，Hutchinson EJ，Mindell JS，Warren RF，2001. The transport sector as a source of air pollution. *Atmospheric Environment*，35：1 537 – 1 565.

Cui W，2005. The damage and influencing factors of the pollutants in car exhaust gases. *Farm Machinery Using & Maintenance*，6：32 – 33. [崔巍，2005. 汽车废气污染物的危害性和影响因素. 农机使用与维修，6：32 – 33]

Cuny D，Haluwyn CV，Pesch R，2001. Biomonitoring of trace elements in air and soil compartments along the major motorway in France. *Water*，*Air*，*and Soil Pollution*，125：273 – 289.

Dohmen GP，1985. Secondary effects of air pollutions：enhanced aphid growth. *Environmental Pollution* (*Series A*)，39：227 – 234.

Dohmen GP，1988. Indirect effects of air pollutants：Changes in plant/parasite interactions. *Environmental Pollution*，53：197 – 207.

Dohmen GP，McNeill S，Bell JNB，1984. Air pollution increases *Aphis fabae* pest potential. *Nature*，307 (1)：52 – 53.

Endress AG，Post SL，1985. Altered feeding preference of Mexican bean beetle，*Epilachna varivestis* for ozonated soybean foliage. *Environmental Pollution* (*Series A*)，39：9 – 16.

Erdman HE，1980. Ozone toxicity during ontogeny of two species of flour beetles，*Tribolium confusum* and *T. castaneum*. *Environmental Entomology*，9 (1)：16 – 17.

Fink S，1998. Histological and cytological changes caused by air pollutants and other abiotic factors. In：Schulte-Hostede S，Darrall NM，Blank LW，Wellburn AR eds. Air Pollution and Plant Metabolism. Elsevier Applied Science，London. 36 – 54.

Flückiger W，Oertli JJ，Baltensweiler W，1978. Observations of an aphid infestation on hawthorn in the vicinity of a motorway. *Naturwissenschaften*，65：654－655.

Führer E，1985. Air pollution and the incidence of forest insect problems. *Z. Angew. Entomol.*，99（4）：371－377.

Gate IM，McNeill S，Ashmore MR，1995. Effects of air pollution on the searching behavior of an insect parasitoid. *Water，Air and Soil Pollution*，85：1 425－1 430.

Ge F，Chen FJ，2006. Impacts of elevated CO_2 on insects. *Acta Ecologica Sinica*，26：935－944.［戈峰，陈法军，2006. 大气 CO_2 浓度增加对昆虫的影响. 生态学报，26：935－944］

Ginevan ME，Lane DD，1978. Effects of sulfur dioxide in air on the fruit fly，*Drosophila melanogaster*. *Environmental Science and Technology*，12：828－831.

Grodzki W，McManus M，Knízek M，Meshkova V，Mihalciuc V，Novotny J，Turčani M，Slobodyan Y，2004. Occurrence of spruce bark beetles in forest stands at different levels of air pollution stress. *Environmental Pollution*，130：73－83.

Hausberger S，Rodler J，Sturm P，Rexeis M，2003. Emission factors for heavy-duty vehicles and validation by tunnel measurements. *Atmospheric Environment*，37：5 237－5 245.

Holopainen JK，Kainulainen E，Oksanen J，Wulff A，Kärenlampi L，1991. Effect of exposure to fluoride，nitrogen compounds and SO_2 on the numbers of spruce shoot aphids on Norway spruce seedlings. *Oecologia*，86（1）：51－56.

Holopainen JK，Kainulainen E，Oksanen J，1997. Growth and reproduction of aphids and levels of free amino acids in Scots pine and Norway spruce in an open-air fumigation with ozone. *Global Change Biology*，3：139－147.

Holton MK，Lindroth RL，Nordheim EV，2003. Foliar quality influences tree-herbivore-parasitoid interactions：effects of elevated CO_2，O_3，and plant genotype. *Oecologia*，137：233－244.

Hooda PS，Miller A，Edwards AC，2007. The distribution of automobile catalysts-cast platinum，palladium and rhodium in soils adjacent to roads and their uptake by grass. *Science of the Total Environment*，384：384－392.

Houlden G，McNeill S，Aminu-Kano M，Bell JNB，1990. Air pollution and agricultural aphid pest. Ⅰ Fumigation experiments with SO_2 and NO_2. *Environmental Pollution*，67：305－314.

Houlden G，McNeill S，Craske A，Bell JNB，1991. Air pollution and agricultural aphid pests. Ⅱ Chamber filtration experiments. *Environmental Pollution*，72（1）：45－55.

Hueglin C，Buchmann B，Weber RO，2006. Long-term observation of real-world road traffic emission factors on a motorway in Switzerland. *Atmospheric Environment*，40：3 696－3 709.

Huttunen S，1994. Effects of air pollutants on epicuticular wax structure. In：Percy KE，Cape JN，Jagels R，Simpson CJ eds. Air Pollutants and the Leaf Cuticle（NATO ASI Series，Vol. G 36）. Springer-Verlag，Berlin. 81－96.

Jackson DM，Rufty TW，Heagle AS，Severson RF，Eckel RVW，2000. Survival and development of tobacco hornworm larvae on tobacco plants grown under elevated levels of ozone. *Journal of Chemical Ecology*，26：1－19.

Jeffords MR，Endress AG，1984. Possible role of ozone in tree defoliation by the gypsy moth（Lepidoptera：Lymantriidae）. *Environmental Entomology*，13：1 249－1 252.

Jiang WM，Cai CX，Yang T，Xu ZT，2001. Numerical simulation on the form and distribution of ozone by urban traffic exhaust emission. *Scientia Meteorologica Sinica*，21：409－416.［蒋维楣，蔡晨霞，杨涛，徐振涛，2001. 城市交通废气与低层大气臭氧形成和分布的数值模拟. 气象科学，21：409－416］

Jones ME，Paine TD，2006. Detecting changes in insect herbivore communities along a pollution gradient. *Environmental Pollution*，143：377－387.

Kainulainen P，Satka H，Mustaniemi A，Holopainen JK，Oksanen J，1993. Conifer aphids in an air polluted environment. Ⅱ. Host plant quality. *Environmental Pollution*，80：193－200.

Kang LF，Li FR，Zhang AS，Tan JA，Yang FW，Hei WL，Liu JB，2006. Effects of traffic pollution on urban soils and plants. *Environmental Science*，27：556－560.［康玲芬，李锋瑞，张爱胜，谈建安，杨发旺，黑文龙，刘江斌，2006. 交通污染对城市土壤和植物的影响. 环境科学，27：556－560］

Kuhns HD，Mazzoleni C，Moosmüller H，Nikolic D，Keislar RE，Barber PW，Li Z，Etyemezian V，Watson JG，2004. Remote sensing of PM，NO，CO，and HC emission factors for on-road gasoline and diesel engine vehicles in Las Vegas，NV. *Science of the Total Environment*，322：123－137.

Lehtiö H，1981. Effects of air pollution on the volatile oil in needles of Scots pine（*Pinus silvestris* L.）. *Silva Fennica*，15：122－129.

Levy R，Chiu YJ，Cromroy HL，1972. Effects of ozone on three species of Diptera. *Environmental Entomology*，1：608－611.

Li QL，Wang XJ，2004. Influence of vehicle exhaust on the contents of Pb in soil and vegetables. *Ecology and Environment*，13：17－18.［李其林，王显军，2004. 汽车尾气对土壤和蔬菜中铅含量的影响. 生态环境，13：17－18］

Li TA，1992. The physiological variaion of plant nutrition and resistance to insects under air pollution. *Agro-envrionmental Protection*，4：1－4.［李天安，1992. 空气污染下植物营养和抗虫性的生理变化. 农业环境保护，4：1－4］

Li XH，1998. Influence and protection of road traffic on environment. *Shanxi Traffic Science and Technology*，2：47－49.［李仙虎，1998. 道路交通对自然环境的影响及保护. 山西交通科技，2：47－49］

Li XZ，Wu KJ，Gong PY，Cao HF，Shu JM，Xiong YJ，1992. Performances of experimental populations of aphids，*Myzu Persicae*（Sulzer），feeding on the rape leaves exposed to SO_2. *Acta Ecologica Sinica*，12（2）：135－140.［李秀珍，吴坤君，龚佩瑜，曹洪法，舒检民，熊严军，1992. SO_2 污染油菜对桃蚜实验种群生长的影响. 生态学报，12（2）：135－140］

Li YH，Hu YM，Li XZ，Xiao DN，2003. A review on road ecology. *Chinese Journal of Applied Ecology*，14：447－452.［李月辉，胡远满，李秀珍，肖笃宁，2003. 道路生态研究进展. 应用生态学报，14：447－452］

Li ZP，Wu S，1991. Acid rain and poison fog do harm to nectar source and bees，and the way to deal with the situation. *Journal of Bee*，3：3－5.

[李忠谱，吴曙，1991. 酸雨与毒雾对蜜源与蜜蜂的危害及其对策. 蜜蜂杂志，3：3－5]

Luo JP，Xia N，Shen GD，2006. Isoflavone accumulation associated with cell structure changes in *Maackia amurensis* suspension cultures elicited by methyl jasmonate，salicylic acid and nitric oxide. *Journal of Molecular Cell Biology*，39（5）：438－444. [罗建平，夏宁，沈国栋，2006. 茉莉酸甲酯、水杨酸和一氧化氮诱导怀槐悬浮细胞合成异黄酮及细胞结构变化. 分子细胞生物学报，39（5）：438－444]

Lü ZX，Yang ZF，Hu P，1994. Promotive effects of air pollution on insect-pest population. *Environmental Pollution & Control*，16（6）：30－32. [吕仲贤，杨樟法，胡苹，1994. 空气污染对害虫种群的促进作用. 环境污染与防治. 16（6）：30－32]

Marsh S，Miller AJ，Zhang XH，Pearson J，2004. Tree leaf biomarkers for atmospheric nitrogen deposition. *Water，Air，and Soil Pollution*，4：241－250.

Migula P，Karpińska B，1988. The effect of atmospheric pollution on α-glycerophosphate dehydrogenase activity in the satin moth（*Leucoma salicis*（L.）. *Environmental Monitoring and Assessment*，11：69－78.

Mondor EB，Tremblay M，Awmack CS，Lindroth RL，2004. Divergent pheromone mediated insect behavior under global atmospheric change. *Global Change Biology*，10：1 820－1 824.

Moreau JP，1988. Maize，aphids and pollution：a catastrophic association. *Phytoma*，398：22.

Ni J，Song YC，1997. Protential changes under elevated carbon dioxde of dominants and companions of evergreen broad leaved forest in subtropical China. *Journal of Plant Ecology*，21（5）：455－467. [倪健，宋永昌，1997. CO_2倍增条件下中国亚热带常绿阔叶林优势种及常见种分布区的可能变迁. 植物生态学报，21（5）：455－467]

Neuvonen S，Saikkonen K，Haukioja E，1990. Simulated acid rain reduces the susceptibility of the European pine sawfly（*Neodiprion sertifer*）to its nuclear polyhedrosis virus. *Oecologia*，83：209－212.

Palokangas P，Neuvonen S，Haapala S，1995. The effects of simulated acid rain on growth and susceptibility to predation of *Phratora polaris*（Coleoptera，Chrysomelidae）. *Envionmental Pollution*，89：67－71.

Petters RM，Mettus RV，1982. Reproductive performance of *Bracon hebetor* females following acute exposure to sulphur dioxide in air. *Environmental Pollution*（*Series A*），27：155－163.

Port GR，Thompson JR，1980. Outbreaks of insect herbivores on plants along motorways in the United Kingdom. *Journal of Applied Ecology*，17：649－656.

Price PW，Rathcke BJ，Gentry DA，1974. Lead in terrestrial arthropods：evidence for biological concentration. *Environmental Entomology*，3：370－372.

Qian YY，1987. The exhaust pollution of car engines and its control. China Communications Press，Beijing. 33 pp. [钱耀义，1987. 汽车发动机排放污染与控制. 北京：人民交通出版社. 33 页]

Qin JD，1980. The physiological bases of phagous-characters of herbivore insect. *Acta Entomologica Sinica*，23（1）：106－122. [钦俊德，1980. 植食性昆虫食性的生理基础. 昆虫学报，23（1）：106－122]

Redak RA，Paine TD，Trumble JT，1995. *Trirhabda geminata*（Coleoptera：Chrysomelidae）resistance to the direct impact of simulated acidic fog on larval growth and mortality. *Environmental Pollution*，90（1）：61－65.

Saikkonen KT，Neuvonen S，1993. Effects of larval age and prolonged simulated acid rain on the susceptibility of European pine sawfly to virus infection. *Oecologia*，95：134－139.

Sardi K，1981. Changes in the soluble protein content of soybean（*Glycine max* L.）and pea（*Pisum sativum* L.）under continuous SO_2 and soot pollution. *Environmental Pollution*（*Series A*），25：181－186.

Stinner DH，Stinner BJ，McCartney DA，1988. Effects of simulated acidic precipitation on plant-insect interactions in agricultural systems：corn and black cutworm larvae. *Journal of Environmental Quality*，17：371－376.

Sun SC，Bao WK，2004. Restoration Ecology. Chemical Industry Press，Beijing. 133－146. [孙书存，包维楷，2004. 恢复生态学. 北京：化学工业出版社. 133－146]

Urbini A，Sparvoli E，Turillazzi S，2006. Social paper wasps as bioindicators：a preliminary research with *Polistes dominulus*（Hymenoptera：Vespidae）as a trace metal accumulator. *Chemosphere*，64（5）：697－703.

Viskari EL，Kössi S，Holopainen JK，2000. Norway spruce and spruce shoot aphid as indicators of traffic pollution. *Environmental Pollution*，107（3）：305－314.

Wang JJ，Zhao ZM，2002. Study on the stress impacts of simulated acid rain on *Tetranychus cinnabarinus*. In：The Entomological Society of China ed. Innovation and Progress of Entomology. Beijing：China Science and Technology Press. 693－696. [王进军，赵志模，2002. 模拟酸雨对朱砂叶螨的胁迫作用研究. 见：中国昆虫学会主编. 昆虫学创新与发展. 北京：中国科学技术出版社. 693－696]

Wang JW，Wu JY，2004. Involvement of nitric oxide in elicitor-induced defense responses and secondary metabolism of *Taxus chinensis* cells. *Nitric Oxide*，11：298－306.

Wellburn AR，Wolfenden J，1986. Internal pH changes within vegetation in response to acidic precipitation as revealed by highfield ^{31}P-NMR. In：Direct Effects of Dry and Wet Deposition on Forest Ecosystems－in Particular Canopy Interactions. *Air Pollution Research Report*，4：161－166.

Williamson P，Evans PR，1972. Lead：levels in roadside invertebrates and small mammals. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*，8（5）：280－288.

Williamson P，Evans PR，1973. A preliminary study of the effects of high levels of inorganic lead on soil fauna. *Pedobiologia*，13：16－21.

Wu KJ，1988. Effect of air pollution on insects. *Entomological Knowledge*，25（2）：122－127. [吴坤君，1988. 空气污染对昆虫的影响. 昆虫知识，25（2）：122－127]

Wu KJ，Gong PY，Li XZ，Shu JM，Cao HF，1990. Performances of the army worm，*Mythimna separata*（Walker），feeding on wheat foliage fumigated with SO_2. *Acta Scientiae Circumstantiae*，10（1）：78－82. [吴坤君，龚佩瑜，李秀珍，舒检民，曹洪法，1990. SO_2 熏蒸小麦对粘虫生长的影响. 环境科学学报，10（1）：78－82]

Wu KJ，Gong PY，Li XZ，1997. Indirect effect of SO_2 pollution on agricultural insect pests. *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*，3（2）：158－162. [吴坤君，龚佩瑜，李秀珍，1997. SO_2 污染对农业害虫的间接影响. 应用与环境生物学报，3（2）：158－162]

Wu Y，1989. Effects of SO_2 on Mexican bean beetle，*Epilachna varivestis*. *Acta Ecologica Sinica*，9（4）：336–340.［吴亚，1989. 二氧化硫对墨西哥瓢虫（*Epilachna varivestis*）的影响. 生态学报，9（4）：336–340］

Wu Y，Jin CX，1990. Environmental stress and biological defence reactions. *Journal of Ecology*，9（5）：46–49.［吴亚，金翠霞，1990. 环境胁迫与生物防御反应. 生态学杂志，9（5）：46–49］

Wu Y，Jin CX，1991. Advance in the ecological effects of O_3 on insects. *Environmental Protection Science*，17（1）：53–55.［吴亚，金翠霞，1991. 臭氧对昆虫生态影响的研究概况. 环境保护科学，17（1）：53–55］

Wu Y，Jin CX，1992. The effects and mechanism of interaction between plant and insects under air pollution. In：Proceedings of Young Ecologists，Ⅱ. 32–36.［吴亚，金翠霞，1992. 空气污染对植物与昆虫相互作用的影响及作用机制. 青年生态学论丛（二）. 32–36］

Wu Y，Jin CX，1993. Effects of atmospheric pollution on plant diseases and pests. *Chinese Journal of Ecology*，12（6）：49–53.［吴亚，金翠霞，1993. 空气污染对植物病虫害的影响. 生态学杂志，12（6）：49–53］

Wu Y，Lee EH，Barrows EM，1990. The effects of ozone on feeding and growth of the larvae of Mexican bean beetle，*Epilachna varivestis*. *Acta Entomologica Sinica*，33：161–165.［吴亚，Lee EH，Barrows EM，1990. 臭氧对墨西哥豆瓢虫（*Epilachna varivestis*）幼虫取食和生长的影响. 昆虫学报，33：161–165］

Xie YP，Xue JL，Liu HX，Liu XQ，Li JP，1998. A study on the accumulations of urban air pollutions SO_2 and Pb in the body of *Eulecanium gigantea*（S.）（Coccidae）and their host-plants *Sophora japonica*. *Scientia Silvae Sinicae*，34（1）：45–49.［谢映平，薛皎亮，刘红霞，刘贤谦，李景平，1998. 城市空气污染物 SO_2 和 Pb 在大球蚧及其寄主国槐体内积累的研究. 林业科学，34（1）：45–49］

Xu MJ，Dong JF，2005. Nitric oxide stimulates indole alkaloid production in *Catharanthus roseus* cell suspension cultures through a protein kinase-dependent signal pathway. *Enzyme and Microbial Technology*，37（1）：49–53.

Yang JK，Ji LZ，Shao YH，Qu SP，Wei YL，1991. Study on the relation between masson pine（*Pinus massoniana*）affected by acid rain and the occurrence of insect pest. *Chinese Journal of Environmental Science*，12（1）：33–37.［杨金宽，姬兰柱，邵玉华，曲世鹏，危永亮，1991. 马尾松酸雨危害与次期性害虫之间关系的研究. 环境科学，12（1）：33–37］

Yang SC，Xu JQ，Zhu WL，Hong G，Wu YK，1993. A study of the effect of automobile exhaust gas on the atmospheric environment. *Journal of Ocean University of Qingdao*，23（1）：115–122.［杨三才，徐静琦，竺维丽，洪光，吴玉坤，1993. 环胶州湾公路海上段汽车尾气的环境影响. 青岛海洋大学学报，23（1）：115–122］

Ye ZJ，2006. Impact on lead content of peripheral soil in highway caused by tail gas of automobile. *China Environment Protection Industry*，1：28–29.［叶中进，2006. 汽车尾气对公路周边土壤铅含量的影响. 中国环保产业，1：28–29］

Yin ZD，Li YW，Gu ZY，Zhao FY，Zhao YN，Zhou XC，2006. On the environmental impacts of road construction and ecological road construction. *Research of Soil and Water Conservation*，13：161–164.［尹忠东，李一为，辜再元，赵方莹，赵廷宁，周心澄，2006. 论道路建设的生态环境影响与生态道路建设. 水土保持研究，13：161–164］

Yu GR，2001. Traffic pollutions reduced crop yields. *Fujian Environment*，18（2）：40.［于光荣，2001. 交通污染使作物减产. 福建环境，18（2）：40］

Yu WG，Yang YW，2006. The damages of automobile exhaust gas and its management tactics. *Heilongjiang Jiaotong Keji*，11：122–124.［孟文阁，杨毅伟，2006. 汽车尾气的危害及其治理措施. 黑龙江交通科技，11：122–124］

Zechmeister HG，Hohenwallner D，Riss A，Hanus-Illnar A，2005. Estimation of element deposition derived from road traffic sources using mosses. *Environmental Pollution*，138：238–249.

Zera AJ，Koehn RK，Hall JG，1985. Allozymes and biochemical adaptation. In：Kerkut GA，Gilbert LI eds. Comprehensive Insect Physiology，Biochemistry and Pharmacology. Pergamon Press. 633–674.

Zhang H，1994. Ultrastructural changes and secondary chemicals reproduction of the cultured plant cells. *Chinese Bulletin of Botany*，11（1）：12–19.［张泓，1994. 植物培养细胞的形态分化与次生代谢产物的生产. 植物学通报，11（1）：12–19］

Zhang JP，2004. Mechanisms and ecological fitness assessment of *Tetranychus cinnabarinus* adaptable to acid rain impact. PhD Thesis，Southwest Agrucultural University，Chongqing. 178 pp.［张建萍，2004. 朱砂叶螨（*Tetranychus cinnabarinus*）适应酸雨胁迫的机理及生态适合度评估. 重庆：西南农业大学博士论文. 178页］

Zhang JP，Wang JJ，Zhao ZM，2004. Effect of acid rain on a plant-insect pest-natural enemy ecosystem. *Entomological Knowledge*，40：11–15.［张建萍，王进军，赵志模，2004. 酸雨对植物-害虫-天敌系统的作用. 昆虫知识，40：11–15］

Zhang Y，Ye WH，Li YL，2002. Effect of atmospheric pollution on phytophagous insects and its mechanism. *Rural Eco-environment*，18（3）：49–55.［张云，叶万辉，李跃林，2002. 大气污染对植食昆虫的影响及作用机制. 农村生态环境，18（3）：49–55］

Zhao CY，Qi Q，Ji HB，Li WC，2001. Determination of heavy metals and sulfur in poplar leaves of the main traffic road and study on atmosphere pollution state in Beijing. *Journal of Beijing Normal University（Natural Science）*，37：796–799.［赵承易，戚琦，季海冰，李维超，2001. 北京交通干道旁杨树叶中重金属和硫的测定及大气污染状况的研究. 北京师范大学学报（自然科学版），37：796–799］

Zi K，Huang YQ，Tu XK，Yang RF，2006. An investigation into the total amount of pollutants emission from motor vehicle in city. *Automotive Engineering*，28：707–710.［訾琨，黄永青，涂先库，杨仁法，2006. 城市机动车污染物排放总量调查. 汽车工程，28：707–710］

（责任编辑：袁德成）